

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

Využití Zigbee technologie v průmyslovém provozu

Using ZigBee Technology in Industrial Plants

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Zadání bakalářské práce

Student:

David Míček

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2612R059 Mobilní technologie

Téma:

Využití technologie ZigBee v průmyslových provozech
Using ZigBee Technology in Industrial Plants

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte popis a aplikační možnosti bezdrátové technologie ZigBee.
2. Navrhněte mobilní systém s komponenty ZigBee pro praktické ověření použitelnosti této technologie v těžkých průmyslových provozech dolů a hutí.
3. Návrh musí obsahovat řešení technických i programových prostředků.

Seznam doporučené odborné literatury:


Vlastní literární rešerše k řešené problematice.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Zdeněk Tesař**

Datum zadání: 16.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013


prof. RNDr. Vladimír Vašínek, CSc.
vedoucí katedry





prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Dne: 7.5.2013



.....
podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval *Ing. Zdeňku Tesařovi, Ing. Liboru Michalkovi, Ph.D. a Ing. Marku Dvorskému, Ph.D.* za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této bakalářské práce.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zaměřuje na poměrně novou bezdrátovou technologii - Zigbee. Popisuje strukturu komunikačního standardu dle OSI modelu, srovnává technologii Zigbee dle standardu IEEE 802.15.4 s podobnými technologiemi pro bezdrátovou komunikaci jako např. Bluetooth, Wi-Fi nebo GPRS, dále se zabývá možnostmi využití této technologie v průmyslových budovách a v široké škále uplatnění jako např. řízení budov, automatizace, zabezpečovací systémy nebo bezdrátová komunikace. Cílem této práce je popsat principy této technologie a navrhnout praktické řešení uvnitř průmyslu v těžkých provozech a dolech. Návrh celé sítě bude obsahovat technické i programové prostředky. Dále bude provedena simulace šíření signálu v pásmu 2,4 GHz a komunikace se ZigBee moduly, výsledky ze simulace budou analyzovány a vyhodnoceny.

Klíčová slova

ZigBee, IEEE 802.15.4, průmyslové provozy, návrh, I-Prop, ZigBee koordinátor

Abstract

This bachelor thesis is focused on the relatively new wireless technology - Zigbee. Thesis describes the structure of the communication standard according to the OSI model, compares ZigBee technology according to the standard IEEE 802.15.4 with similar technologies for wireless communications, such as Bluetooth, Wi-Fi or GPRS. Thesis deals with possibilities of using this technology in industrial buildings and with a wide range of applications such as the building management, automation, security systems and wireless communications. The main goal of this thesis is to describe the principles involved and to propose practical solution for heavy industry and mines. The proposal will include the entire network of hardware and software resources. And in the final part of this thesis will be done a simulation of signal in the 2.4 GHz frequency band and communication with ZigBee modules, the results of the simulations will be analyzed and evaluated.

Key words

ZigBee, IEEE 802.15.4, industrial plants, proposal, I-Prop, ZigBee coordinator

Seznam použitých zkratk

Zkratka	Anglický význam	Český význam
AES	Advanced Encryption Standard	Šifrovací algoritmus
APL	Aplication Layer	Aplikační vrstva
APS	Aplication Support Sub-layer	Pomocná aplikační vrstva
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access – Collision Avoidance	Přístupová metoda k médiu
FCS	Frame Check Sequence	Kontrolní mechanismu rámce
FFD	Full-Function Device	Plně funkční zařízení
LQI	Link Quality indicator	Indikátor kvality spojení
MPDU	MAC Protocol Data Unit	Protokol MAC vrstvy
MAC	Medium Access Control	Linková vrstva
NWK	Network Layer	Síťová vrstva
RFD	Reduced-Function Device	Zařízení s redukovanými funkcemi
SHR	Sequence Header	Datová hlavička
PHR	Physical Header	Hlavička fyzické vrstvy
PAN	Personal Area Network	Osobní síť
ZDO	ZigBee Device Object	Objekty ZigBee
ZCP	ZigBee Compliant Platform	Platforma firmy Microchip

Obsah

1	Úvod	1
2	Technologie ZigBee	2
2.1	Historie technologie	2
2.2	Stručný popis technologie	2
2.3	Využití a přednosti ZigBee technologie	2
2.4	Srovnání s dalšími bezdrátovými technologiemi.....	3
2.5	Typy zařízení v síti ZigBee	4
2.6	Frekvenční pásma.....	4
2.7	Topologie sítě ZigBee	5
2.7.1	Topologie hvězda	6
2.7.2	Topologie strom.....	6
2.7.3	Topologie síť	7
2.8	Struktura komunikačního kanálu.....	7
2.8.1	Fyzická vrstva (PHY)	8
2.8.2	MAC vrstva (MAC)	8
2.8.3	Struktura datového rámce	9
2.8.4	Síťová vrstva (NWK)	10
2.8.5	Aplikační vrstva (APL)	10
2.8.6	Zabezpečení komunikace	10
2.9	ZigBee vs. ZigBee Pro	11
2.10	ZigBee moduly na trhu.....	11
2.10.1	Moduly Microchip.....	12
2.10.2	Moduly Freescale	12
2.10.3	Moduly Meshnetics	13
3	Testování komunikace kitu RC2200AT-SPPIO.....	15
3.1.1	Nastavení a spárování modulů.....	15

3.1.2	Komunikace mezi moduly a měření přijímací úrovně signálu	16
4	Návrh mobilního systému	18
4.1	Návrh sítě ZigBee.....	18
4.1.1	Příklad komunikace mezi zařízeními.....	20
4.2	Popis prostředí	20
4.3	Simulace v simulačním programu I-Prop	22
4.3.1	Popis programu.....	22
4.3.2	Simulace	22
4.4	Měření šíření signálu v dolech	24
4.4.1	Měření přijímací úrovně	26
4.4.2	Zhodnocení měření	33
5	Závěr.....	34
	Použitá literatura	I

1 Úvod

Zigbee je jednoduchý komunikační standard, který umožňuje vzájemnou komunikaci mnoha zařízení na vzdálenosti stovek metrů. Díky nízkým hardwarovým nárokům a nízké spotřebě najde uplatnění v oblasti řízení budov, spotřební elektroniky a průmyslu, například v podobě bateriově napájených bezdrátových senzorů. A této problematice bych se chtěl v této bakalářské práci věnovat.

V první části této bakalářské práce se zaměřuji na vysvětlení základních principů Zigbee technologie. Dále se zaměřuji na porovnání s nejvíce podobnými bezdrátovými technologiemi, které jsou např. Bluetooth, GPRS a Wi-Fi. Vysvětluji hlavní výhody a nevýhody této technologie. Popisuji základní architekturu technologie, topologii sítě, popis jednotlivých vrstev dle standardu IEEE 802.15.4 a zabezpečení při komunikaci mezi zařízeními. Dále se zabývám popisem vývojovými moduly ZigBee a provedu měření výstupního výkonu při komunikaci mezi nimi.

V další části práce navrhuji mobilní systém s komponenty ZigBee pro praktické ověření použitelnosti této technologie v těžkých průmyslových provozech dolů a hutí. Tento návrh je navržen pro řízení kolejové dopravy v hlubinných dolech. Návrh poslouží jako pomůcka při studiu a pozdějším praktickém využití této technologie v terénu. Jsou v něm zahrnuty všechny technické i programové prostředky sloužící pro praktické zrealizování celé sítě. Dále popisuji specifické prostředí v dolech a dělám simulaci v programu I-Prop v těchto podmínkách a zjišťuji maximální vzdálenost pro umístění přístupových bodů pro navázání komunikace mezi jednotlivými zařízeními. V poslední části mé bakalářské práce provádím měření přijímací úrovně signálu přímo v těžkých provozech v dole Darkov a provádím vyhodnocení výsledků z měření.

2 Technologie ZigBee

2.1 Historie technologie

Bezdrátové komunikační technologie představují jednu z rychle se rozvíjejících oblastí telekomunikačních technologií a ZigBee není mezi nimi žádná výjimka. Vznik bezdrátové komunikace se datuje v období přelomu 19. a 20. století, kdy italský vědec Guglielmo Marconi prováděl své pokusy s bezdrátovým telegrafem. Dále pak se bezdrátová komunikace využívá hlavně k přenosu hlasu a obrazu, ať se jedná v analogové nebo digitalizované podobě. Aplikací technologie, která dovoluje využít UHF (Ultra High Frequency) a mikrovlnná pásma, dochází k rozvoji nízkorychlostních a vysokorychlostních bezdrátových komunikací a bezdrátových sítí.

V roce 2002 byla založena organizace ZigBee Alliance a sdružuje v dnešní době přes 220 nadnárodních firem a korporací (např. Texas Instruments, Analog Devices, Cisco Systems, Freescale Semiconductors, Motorola nebo Mitsubishi Electric) a vzájemnou spoluprací realizují spolehlivé, nízkonákladové a nízkopříkonové bezdrátově propojené kontrolní a řídicí produkty.

2.2 Stručný popis technologie

Zigbee je jednoduchý bezdrátový komunikační standard, který umožňuje vzájemnou komunikaci mnoha zařízení na vzdálenost stovek metrů. Díky nízkým nárokům na hardware a nízké spotřebě najde uplatnění v oblasti řízení budov, spotřební elektroniky a průmyslu, například v podobě bateriově napájených bezdrátových senzorů.

Bezdrátový komunikační standard, který je spravován organizací ZigBee Alliance a též označován jako IEEE 802.15.4, poskytuje cenově nenákladnou, nízkopříkonovou, bezdrátovou komunikaci pro monitorování a řízení systémů. V současné době patří mezi nové, perspektivní komunikační technologie, která se snaží vyplývat z již známých bezdrátových technologií jako jsou Wi-Fi a Bluetooth. Zde se snaží vyplnit mezeru mezi velkou škálou aplikací, pro které nejsou Bluetooth ani Wi-Fi, popřípadě Irda, ideálním řešením, i když se dají použít. [5]

2.3 Využití a přednosti ZigBee technologie

Standard ZigBee lze použít pro jednoduchou bezdrátovou komunikaci s nízkými požadavky na samotný hardware a napájení. A proto jsou jeho hlavní doménou aplikace s bateriovým napájením, kde při výrazně nižší spotřebě energie poskytuje výrazně delší dosah komunikace v porovnání s technologií Bluetooth, jak je vidět v tabulce 1.1 ve srovnání s dalšími bezdrátovými technologiemi. To je vykoupeno nižší přenosovou rychlostí, která však v mnoha aplikacích plně dostačuje. Například dálkové bezdrátové zapínání/vypínání přístrojů v domácnosti (osvětlení, stahování rolet, odmykání a otevírání dveří) nebo programování a ovládání spotřebičů (televize, DVD rekordér, HIFI systém,

klimatizace). Nižší přenosová rychlost poskytuje vyšší odolnost proti rušení, což ZigBee předurčuje pro využití v průmyslu. Zde můžeme zastávat funkci bezdrátové náhrady sériového přenosu RS-232 nebo RS-485. Zde je také nevýhodné a zbytečně složité používat drahé Wi-Fi, když přenosové rychlosti jsou jen desítky kb/s.

2.4 Srovnání s dalšími bezdrátovými technologiemi

Technologie ZigBee se liší od dalších bezdrátových technologií primárně tím, že byla navržena pro aplikace tak, aby jeho spotřeba a cena byla nízká a zaručila se krátká pracovní doba přenosu. Nejbližší bezdrátovou technologií je technologie Bluetooth. Avšak je tomu tak pouze proto, že pracují ve stejném rádiovém pásmu 2,4Ghz, ale ZigBee má navíc ještě další dvě rádiová pásma, ve kterých může navazovat komunikaci. Je to ale stejné, jako porovnávat infračervené dálkové ovladače televize s infračerveným rozhraním IrDa. A hlavní rozdíl je v tom, že ZigBee je předurčený protokol k stavovému přenosu informací nebo k bezpečnému přenosu dat na nevysoké rychlosti. Zato Bluetooth oproti tomu je náhrada datových kabelů a slouží k přenášení náročnějších datových objemů jako například přenos hlasu nebo přenos dat. U Bluetooth se předpokládá, že jej bude někdo systematicky rušit, zato se požaduje, aby data přenášel svižně a aby poskytoval prvky bezpečnosti na bázi párování zařízení. Srovnání parametrů bezdrátových technologií vidíme v tabulce 2.1.

Tabulka 2.1: Srovnání parametrů bezdrátových technologií [5]

Označení technologie	GPRS/GSM	Wi-Fi	Bluetooth	ZigBee
Standard	1xRTT/CDMA	802.11b	802.15.1	802.15.4
Zaměření	Široké oblasti Hlas & Data	Web, Email, Video	Náhrada za kabel	Monitorování & řízení
Systémová paměť	16 MB a více	1 MB a více	250 kB a více	4 kB – 32 kB
Výdrž baterií (dny)	1 – 7	0,5 – 5	1 – 7	100 – 1000 i více
Počet uzlů v síti	1	32	7	Teoreticky až 65 000
Přenosová rychlost (kb/s)	64 – 128	11 000	720	20 – 250
Komunikační dosah (m)	1 000 i více	1 – 100	1 – 10	1 – 100
Hlavní výhody	Dosažitelnost, kvalita	Rychlost, flexibilita	Cena, jednoduchost	Spolehlivost, poměr cena/výkon

2.5 Typy zařízení v síti ZigBee

Dle standardu IEEE 802.15.4 můžeme rozlišovat dva typy zařízení a to plně funkční zařízení *FFD* (*Full-Function Device*) a zařízení s redukovánými funkcemi *RFD* (*Reduced-Function Device*). *FFD* mohou zastávat jak funkci směrovače, tak funkce koordinátora sítě a *RFD* mohou fungovat pouze jako koncová zařízení. Zařízení s úlohou koordinátora sítě musí být typu *FFD* a je schopno přeposílat pakety v síti. Popřípadě pokud zařízení spravuje celou síť, jde o *PAN* (*Personal Area Network*) koordinátora. Ostatní zařízení v síti se nazývají jednoduše jako „zařízení“ a mohou být buďto *FFD* nebo *RFD*.

ZigBee používá mírně odlišnou terminologii. ZigBee koordinátor odpovídá úlohám *PAN* koordinátoru, ZigBee směrovač odpovídá úloze koordinátora dle standardu IEEE 802.15.4 a ZigBee koncové zařízení neplní úlohu směrovače ani úlohu koordinátora. Koncové zařízení má nejmenší potřebnou paměť a jsou nejlevnější prvky v síti. Pro upřesnění tohoto rozdělení je uvedené na obr. 2.1 [7].



Obrázek 2.1: Rozdělení úloh zařízení v ZigBee [2]

2.6 Frekvenční pásma

Zde jsou uvedena tři frekvenční pásma definována standardem IEEE 802.15.4, která byla vydána v roce 2006:

- 868 – 868.6 MHz (pásmo 868 MHz)
- 902 – 928 MHz (pásmo 915MHz)
- 2400 – 2483.5 MHz (pásmo 2.4GHz)

Pásmo 868 MHz je používáno pro zařízení v Evropě. Pásmo 915 MHz je vyhrazeno pro americký kontinent a pásmo 2,4 GHz je používáno celosvětově. Dle standardu IEEE 802.15.4 definuje, že pokud je podporováno pásmo 868 MHz, tak musí podporovat i pásmo 915 MHz a opačně. Proto jsou vždy tyto dvě pásma označovány společně jako 868/915 MHz. V pásmu 868 MHz je definován pouze jeden kanál pro komunikaci, u 915 MHz je to deset kanálů a nejvíce kanálů pro přenos dat je možné použít u pásma 2,4 GHz a to 16. V některých aplikacích je však výhodnější použít pásma 868/915 MHz pokud je například pásmo 2,4GHz příliš rušeno. Signál šířící se v pásmu 868/915 MHz také lépe proniká přes stěny a další zastavěné části kvůli nízkým přenosovým rychlostem. Jsou zde tři typy modulací: *BPSK* (*Binary Phase Shift Keying*), *ASK* (*Amplitude Shift Keying*) a v neposlední řadě *O-QPSK* (*Offset Quadrature Phase Shift Keying*). Přehled všech frekvenčních pásem a druhů modulací je zobrazeno v tabulce 2.2 [2].

Tabulka 2.2: Přehled frekvenčních pásem a druhů modulací dle standardu IEEE 802.15.4 [3]

Frekvence (MHz)	Počet kanálů	Druh modulace	Čipová rychlost (Kchip/s)	Přenosová rychlost (Kb/s)	Metoda šíření
868 – 868,6	1	BPSK	300	20	Binární DSSS
902 – 928	10	BPSK	600	40	Binární DSSS
868 – 868,6	1	ASK	400	250	20-bitový PSSS
902 – 928	10	ASK	1600	250	5-bitový PSSS
868 – 868,6	1	O-QPSK	400	100	16-stavový ortogonální
902 – 928	10	O-QPSK	1000	250	16-stavový ortogonální
2400 – 2483,5	16	O-QPSK	2000	250	16-stavový ortogonální

2.7 Topologie sítě ZigBee

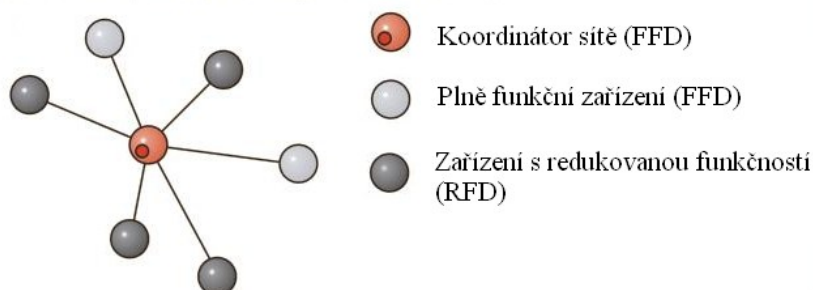
Standard IEEE 802.15.4 používá pro adresaci jednotlivých zařízení binární adresovací kódy, které mohou být buď dlouhé (64bitů) nebo zkrácené (16bitů). Lokální adresa zkráceného adresovacího kódu umožňuje v síti adresovat maximálně 65 535 zařízení. Každá sestavená síť je dále identifikována 16-bitovým identifikátorem *PAN ID*, který slouží pro rozlišení překrývajících se sítí v případě, že v jednom prostoru dochází k vytvoření a sestavení více sítí standardu IEEE 802.15.4. Každou síť s unikátním *PAN ID* zakládá a spravuje koordinátor (centrální stanice), přičemž ostatní stanice pracují

v módu koncové stanice. Každá koncová stanice může být konfigurována pro funkci směrovače nebo koncového zařízení.

Standard ZigBee založený na fyzické a linkové vrstvě IEEE 802.15.4 definuje tři typy síťové topologie (hvězda, strom, síť).

2.7.1 Topologie hvězda

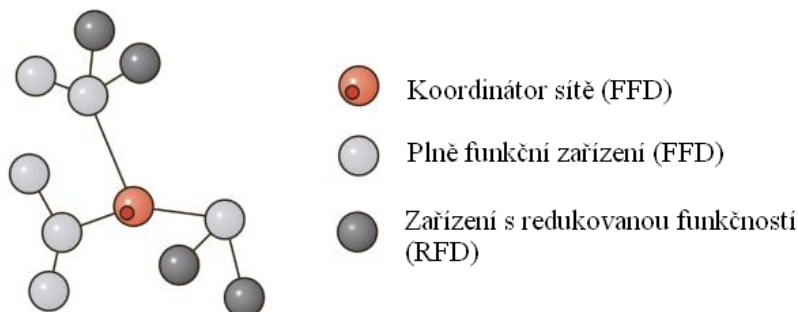
V topologii typu hvězda (star topology), zobrazeno na obrázku 2.2, je definováno pouze jedno zařízení jako koordinátor sítě a ostatní zařízení přebírají funkci koncových zařízení (*RFD* nebo *FFD*). Hlavní koordinátor by měl být napájen stalým napájecím napětím, přičemž ostatní zařízení mohou být napájeny bateriově [8].



Obrázek 2.2: Topologie hvězda [8]

2.7.2 Topologie strom

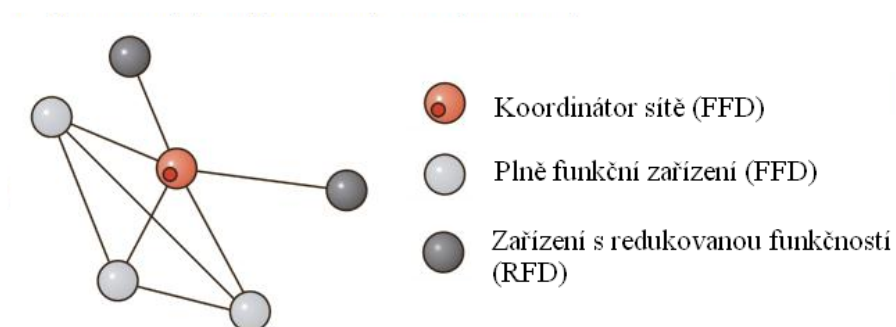
V topologii strom (tree topology) slouží jedno zařízení jako koordinátor sítě a ostatní jako koncová zařízení. Na rozdíl od topologie hvězda však nemusí všechna zařízení komunikovat přímo s koordinátorem, ale mohou využít jiné koncové zařízení v konfiguraci FFD ve funkci směrovače a použít jej jako prostředníka. Díky tomu umožňuje uvedená konfigurace zvětšit vzdálenost mezi koncovým zařízením a koordinátorem, což je zobrazeno na obrázku 2.3 [8].



Obrázek 2.3: Topologie strom [8]

2.7.3 Topologie síť

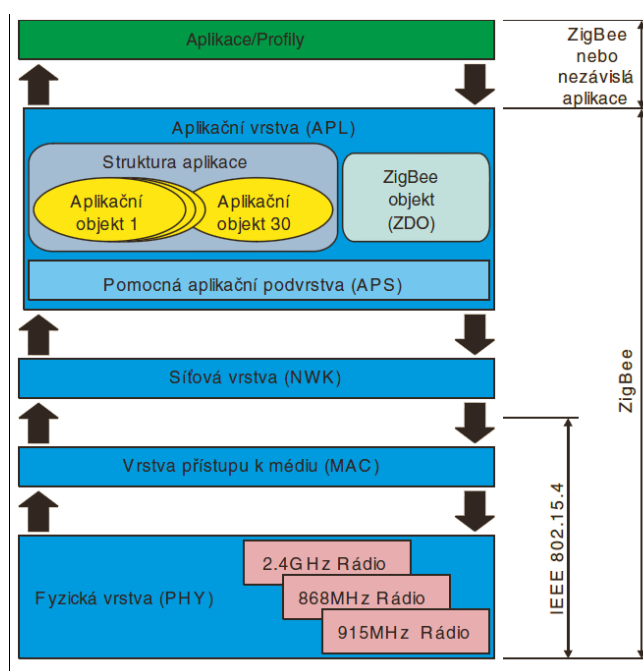
V topologii síť (mesh topology) se setkáváme s vlastnostmi topologií hvězda a strom (tzv. hybridní topologie). Síťová topologie přináší největší funkčnost, protože umožňuje sestavit síť libovolným způsobem. Typická struktura topologie síť je zobrazena na obrázku 2.4.



Obrázek 2.4: Topologie síť [8]

2.8 Struktura komunikačního kanálu

Stejně jako každý jiný komunikační standard i ZigBee lze popsat pomocí *Open System Interconnect* (OSI) modelem. Ten lze rozdělit do tří základních bloků podle toho, kým jsou definovány (obrázek 2.5).



Obrázek 2.5: Architektura protokolové struktury ZigBee [8]

Standard IEEE 802.15.4 – definuje fyzickou a linkovou vrstvu OSI modelu

ZigBee – definuje vyšší vrstvy OSI modelu (síťová a aplikační)

Aplikace – definuje zákaznickou aplikaci v aplikační vrstvě OSI modelu

Struktura protokolů je navržena maximálně úsporně kvůli předpokládané implementaci do málo výkonných jednočipových 8bitových mikrokontrolérů s velmi omezenými paměťovými dispozicemi. Proto struktura protokolů nezabere více než asi 30 kB v systémové paměti, a je tedy mnohonásobně úspornější než standard Bluetooth, který vyžaduje více než 100 kB operační paměti.

2.8.1 Fyzická vrstva (PHY)

Pro přístupování k fyzickému médiumu je použita metoda *CSMA/CA* (*Carrier Sense Multiple Acces with Collision Avoidance and optional time slotting*). Máme tedy na výběr, zda budeme chtít využívat časové úseky (*time slots*) nebo ne. Signál je přenášen pomocí rozprostírání spektra *DSSS* (*Direct Sequence Spread Spektrum*), stejně jako je tomu u technologie Wi-Fi.

U metody *CSMA/CA* koncový uzel naslouchá, zda-li někdo jiný nevysílá na daném médiumu (vzduch). Pokud nebyl detekován žádný přenos, začne vysílat data. V případě detekce jiného přenosu vyčká náhodnou vygenerovanou čekací dobu a poté začne s vysíláním dat. Náhodná doba je z důvodu snížení pravděpodobnosti kolize [9].

Je zodpovědná za následující úlohy:

- aktivaci a deaktivaci rádiového vysílače a přijímače
- detekci energie na daném kanálu
- indikátor kvality spojení (*LQI – Link Quality Indicator*) pro přijaté rámce
- výběr frekvence kanálu
- příjem a odesílání dat

Tato vrstva pracuje ve více rádiových pásmech, jak již bylo vysvětleno v kapitole 2.6.

2.8.2 MAC vrstva (MAC)

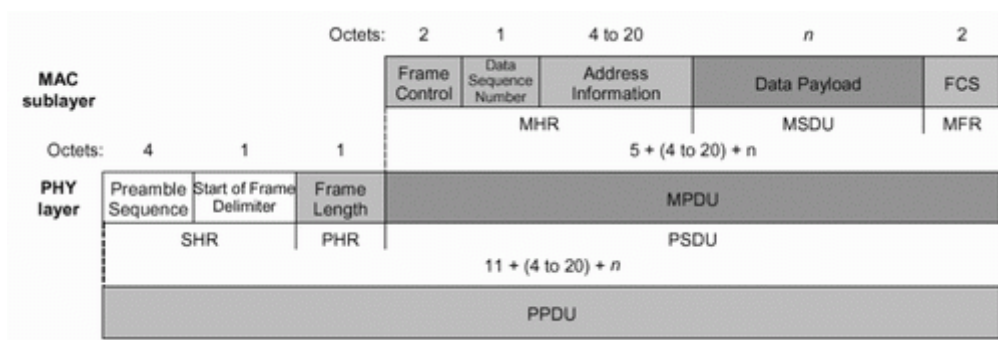
Nejdůležitější součástí komunikačního kanálu v ZigBee je linková vrstva, která je odpovědná za veškerou komunikaci a adresování mezi uzly v síti pomocí rámců. Konkrétně jsou definovány čtyři typy komunikačních rámců využívané buď pro přenos užitečných datových informací nebo k režijním účelům souvisejícím se sestavením, správou a řízením sítě:

-
- *Data Frame* – rámec pro přenos užitečné informace pro všechny datové přenosy s maximální délkou 104 B
 - *Acknowledgement Frame* – rámec pro přenos potvrzovací informace a je využitelný pouze na úrovni MAC pro potvrzovanou komunikaci a informuje o správném přijetí rámce
 - *MAC Command Frame* – rámec k centralizovanému konfigurování, nastavení a řízení klientských zařízení v síti
 - *Beacon Frame* – rámec k synchronizaci zařízení v síti a je využíván hlavně při konfiguraci sítě v módu, v němž umožňuje uvádění klientských zařízení do spánkových režimů s extrémně sníženou spotřebou energie

2.8.3 Struktura datového rámce

Na obrázku 2.6 je blokově zobrazen datový rámec (*Data Frame*) paketu *PPDU*. Paket je definován standardem IEEE 802.15.4 a složený z části dodané *MAC* vrstvou (*MPDU*) a fyzickou vrstvou (*SHR* a *PHR*). *MPDU* obsahuje mimo přenášených dat (až 104 B) i informaci o adrese přijímající stanice, pořadové číslo daného paketu, řízení rámce a kontrolní mechanismus rámce (*FCS* – *Frame Check Sequence*). Část doplňována fyzickou vrstvou obsahuje potřebné informace pro správný fyzický přenos paketu (informace o délce rámce, úvodní preamble pro časové synchronizace přijímače a informaci o začátku rámce).

MAC příkazový rámec (*Command Frame*) se liší pouze náhradou části pro data v daném rámci částí přenášející příkazy. Podobně definovaný potvrzovací rámec (*Acknowledge Frame*) naopak tuto část úplně vypouští. Posledně jmenovaný rámec je velmi důležitý z hlediska vyslání paketů, protože informuje vysílací jednotku, že přijímač ji bez chyb přijal. Navíc díky pevné délce definuje tzv. *Quiet Time* „mrtvý čas“ vytvořený ihned po přenosu paketu [5].



Obrázek 2.6: Datový rámec standardu ZigBee [5]

2.8.4 Síťová vrstva (NWK)

Nad vrstvami standardu IEEE 802.15.4 je ve vlastním standardu ZigBee definována síťová vrstva (*NWK*) a struktura pro aplikační vrstvu (*APL*). Síťová vrstva provádí připojování k síti a odpojování od ní, zabezpečení a směrování paketů. Dále zajišťuje objevování zařízení v rámci jednoho přeskoč. U koordinátora sítě ZigBee je odpovědná za start sítě a přiřazování adres nově začleněným zařízením.

2.8.5 Aplikační vrstva (APL)

Aplikační vrstva protokolu ZigBee se skládá z pomocné aplikační podvrstvy (*APS*), objektů ZigBee (*ZDO*) a uživatelských aplikačních objektů. Výrobci tak mohou vytvářet profily pro různé aplikace. Takovýchto aplikací může být v jednom zařízení až 240. Aplikační pomocná podvrstva udržuje párovací (*binding*) tabulky, které umožňují párování zařízení podle poskytovaných služeb a požadavků. Objekt ZigBee definuje roli zařízení v rámci sítě ZigBee (koordinátor, směrovač nebo koncové zařízení), zajišťuje objevování zařízení a vyhledávání poskytovaných služeb.

2.8.6 Zabezpečení komunikace

Služby zabezpečení plní dvě důležité úlohy. První je zabezpečení důvěrnosti dat proti neautorizovanému odposlechu, a to šifrováním přenášených dat a následné rozšifrování pomocí jedinečného klíče. ZigBee podporuje 128bitové šifrování pomocí algoritmu *AES* (*Advanced Encryption Standard*). Druhou je autentičnost dat. Ta zaručuje původ zprávy a také to, že zpráva nebyla cestou zaznamenána. Problém při realizaci je i to, že většina ZigBee zařízení má omezený výpočtový výkon a je napájena jen bateriově [16].

2.9 ZigBee vs. ZigBee Pro

Na konci roku 2007 vydalo konsorcium ZigBee Alliance novou specifikaci pro bezdrátovou ZigBee komunikaci nazvanou ZigBee PRO. Tato nová specifikace se svými vylepšeními maximalizovalo schopnosti již tak dobré základní ZigBee specifikace pracující ve volném ISM pásmu 2,4 GHz s přenosovou rychlostí 250 kb/s a navíc přidalo funkce pro zjednodušení provozu velkých sítí a snížení spotřeby.

ZigBee PRO má hned několik vylepšení:

- *Rozšiřitelnost sítí* – vylepšená podpora realizace a provozu velkých sítí a snadnější rozšiřitelnost
- *Segmentování* – nová schopnost dělit delší zprávy a možnost interakce s jinými protokoly a systémy
- *Proměnná vysílací frekvence* – dynamická změna kanálů sítě v závislosti na rušení
- *Automatické přidělování adres zařízením* – optimalizované pro velké sítě přidáním řízení sítě a konfiguračních nástrojů
- *Bezdrátové zprovoznění* – doplnění o schopnosti bezpečného bezdrátového zprovoznění
- *Centralizovaný sběr dat* – vyladěný speciálně pro optimalizace informačního toku ve velkých sítích

2.10 ZigBee moduly na trhu

Na trhu je v dnešní době velká škála ZigBee modulů pro široké zaměření použití. Každý z těchto výrobců používá svá vývojová prostředí k daným mikrokontrolérům. Zde jsou uvedeny jednotlivé komunikační platformy dle jednotlivých společností:

- *EmberZNet* společnosti Ember
- *BeeStack* společnosti Freescale
- *USB Dongle* společnosti Integration Associates
- *Z-Stack* společnosti Texas Instruments
- *AirBee* firmy Airbee Wireless využívající hardwarovou platformu Texas Instruments
- *BitCloud* stack společnosti Atmel
- *eZeeNet* ZigBee stack firmy MeshNetics
- *ZigBee Compliant Platform* firmy Microchip

2.10.1 Moduly Microchip

Firma Microchip jakožto člen ZigBee Alliance nabízí ucelená řešení pro *AMR (Automatic Meter Reading)* a také průmyslovou nebo komerční automatizaci.

Hlavní jejich platforma se nazývá *ZCP (ZigBee Compliant Platform)*, která zahrnuje:

- ZigBee® 2006 nebo ZigBee® PRO Protocol Stack
- MRF24J40 2,4 GHz Transceiver nebo jejich moduly
- Vlastní volbu jednoho z členů PIC mikrokontrolérů

2.10.1.1 *Integrovaný transceiver MRF24J40*

- Podpora ZigBee a MiWi protokolů
- 2,4 GHz *MAC* a *PHY*
- 128bitové zabezpečení (*AES*)
- Jednoduché, čtyřdrátové SPI rozhraní
- 40pinové pouzdro *QFN*

Popis MRF24J40 a dokumentace na stránkách výrobce je k dispozici v [18].

2.10.1.2 *Modul transceiveru MRF24J40MB*

Parametry:

- Integrovaná PCB anténa
- Napájecí napětí 2,4 až 3,6 V
- Výstupní výkon: +20 dBm
- Citlivost přijímače: -102 dBm
- Přenosová rychlost: 250 kbps
- Malá proudová spotřeba :

Rx mód: 25 mA

TX mód: 130 mA

Sleep: 5 uA

Nabízí optimalizované řešení a možnost volit z mnoha množství mikrokontrolérů PIC (např. PIC18/PIC24/dsPIC33/PIC32) k daným modulům [19].

2.10.2 Moduly Freescale

Dalším výrobcem na poli bezdrátových obvodů pro ZigBee je firma Freescale. V rámci výrobního programu Freescale, lze do aplikace vestavět ZigBee (IEEE 802.15.4) RF komunikaci v zásadě dvěma způsoby, a to použitím:

-
- integrovaných transceiverů MC1320x a MC1319x + softwarová realizace vyšších vrstev OSI modelu je přímo v CPU nebo MCU již použitých v aplikaci
 - kompletních obvodů *SiP* (*System-in-a-Package*) MC1321x již obsahující v jedné součástce jako transceiver, tak MCU s IEEE 802.15.4 MAC a ZigBee Stackem zajišťující kompletní softwarovou realizaci (adresaci, příkazy apod.)

První varianta je více vhodná pro centrální řízení, tj. pro aplikace, přístroje a zařízení, které již v sobě obsahují nějaký procesor či procesory, které buď nejsou plně využity nebo například mají přímo řídit veškerou komunikaci. Druhá varianta je ideální pro aplikace, kde máme např. jen zapouzdřený inteligentní senzor (např. akcelerometr či senzor tlaku) a chceme pro něj zajistit bezdrátovou komunikaci mezi ostatními senzory nebo s nadřazeným přístrojem, který data uchovává, dále vyhodnocuje nebo zobrazuje. V tomto případě lze použít ZigBee *SiP* (*System In Package*) obvod a výstup senzoru napojit přímo na jeho vstup a naprogramovat ho podle potřeby. Podrobná nabídka na stránkách výrobce [17].

2.10.3 Moduly Meshnetics

Protože firma Meshnetics dnes nabízí mnoho ZigBee modulů na trhu, vybral jsem jeden modul *ZigBit Amp Module* [10], který bych použil pro realizaci mého návrhu ovládání kolejové dopravy v dolech. Jeho výhodou je malé pouzdro a integrovaný U-FL anténní konektor. Modul je postaven na hardwarové platformě AVR Z-link. Nízko příkonový zesilovač poskytuje maximální dosah při zachování nízké spotřeby.

Základní parametry modulu:

- Frekvenční pásmo: 2,400 – 2,400 GHz
- Počet kanálů: 16
- Přenosová rychlost: 250 kbps
- Citlivost (RX): -104 dBm
- Vysílací výkon: 2 – 20 dBm
- Napájecí napětí: 3,0 – 3,6 V
- Spotřeba (RX/TX): 23 mA/50 mA
- Programová paměť: 128 kB
- EEPROM: 4 kB
- Pracovní teplota: -40 °C až +85 °C
- Venkovní dosah – přes 4km (nejlepší ve své třídě)

Podporovaná rozhraní:

- USART/SPI, I2C, 1-wire

-
- UART s RTS/CTS podporou
 - JTAG
 - 9 volných GPIO (25 celkem)
 - 7 ADC linky



Obrázek 2.12: ZigBit AMP Module

2.10.3.1 ***Podporované aplikační stacky***

ZigBit moduly jsou schopné pracovat se třemi základními stacky dostupnými na webu Meshnetics:

- *BitCloud ZigBee PRO*: certifikovaný stack – vyvinutý speciálně pro jednoduché využívání ZigBee sítí ve spolupráci se senzory, při řízení, monitoringu a v aplikacích pro sběr dat. Podporuje MESH a TREE síť.
- *SerialNet* - je používán k programování modulů prostřednictvím sériové linky a AT příkazů.
- *Open Mac* - je open source implementací MAC vrstvy IEEE 802.15.4 od Meshnetics. Tento stack je určen primárně pro studijní účely a „zábavu“.

3 Testování komunikace kitu RC2200AT-SPPIO

K dispozici jsem dostal vývojový kit *RC2200AT-SPPIO* od firmy Radiocrafts, které distribuuje do České republiky firma Macroweil. Jedná se o moduly, které jsou již od výrobce předprogramovány pro aplikace bezdrátového zapínání a vypínání přístrojů (osvětlení). Není tedy nutné přímo nic programovat.

Základní parametry těchto modulů jsou uvedeny na stránkách výrobce [14].

Před samotnou komunikací je potřeba tyto moduly nastavit pomocí AT příkazů uvedeny výrobcem. U konfigurace jsem postupoval dle manuálu, který poskytuje také výrobce [15]. Základní funkce aplikace, nainstalované v ZigBee modulu *RC2200AT*, lze rozdělit na blok navázání koncových zařízení do sítě tvořené koordinátorem a blok samotné praktické aplikace, tj. ovládání (zapínání a vypínání) světel. Jedno zařízení, označené jako *SLC/C*, bude zastávat funkci koordinátoru sítě a druhé zařízení, označené jako *SLC/R*, bude zastávat funkci směrovače. Dále si popíšeme jak tyto moduly nakonfigurovat pro odzkoušení komunikace mezi nimi.

3.1.1 Nastavení a spárování modulů

Pro správné nastavení obou modulů je zapotřebí mít spuštěný program Hyperterminál (pro Windows) nebo pro linuxové prostředí program Minicom.

Sestavení sítě proběhlo následovně v několika krocích:

- Připojíme zařízení označené jako koordinátor pomocí sériového kabelu k PC
- Spustíme program Hyperterminál (HT). Nastavíme správný port, na kterém se zařízení nachází (v mém případě COM5). Dále nastavíme přenosovou rychlost 19 200 bit/s, 1 start bit, žádnou paritu a bez kontroly toku.
- Připojíme modul k napájení (na modulu se rozsvítí zelená LED).
- Pomocí příkazu „+++“ provedeme přepnutí do příkazového režimu, který se potvrdí odpovědí „STATUS05“ a následně můžeme zadávat jednotlivé příkazy.
- Příkazem „ATS3=I“ nastavíme zařízení jako koordinátor sítě. Dále zjistíme MAC adresu zařízení pomocí příkazu „ATS4?“ a zapíšeme si ji.
- Identické nastavení použijeme i v případě nastavení směrovače.
- Dále nastavíme na koordinátoru pomocí příkazu „ATS5=AA-BB-CC-DD-EE-FF-GG-HH“ MAC adresu zařízení, s kterým bude koordinátor komunikovat (AA-BB-CC-DD-EE-FF-GG-HH je 64bitová adresa cílového zařízení). Pomocí příkazu „ATCH11“ nastavíme

frekvenční kanál, na které bude probíhat komunikace a příkazem „*ATPW5*“ (kde hodnota „1-5“ je maximální výstupní výkon 0 dBm) nastavíme největší vysílací výkon. Vždy po zadání jednotlivých příkazů se objeví odpověď „OK“, že vše proběhlo v pořádku. A přejdeme pomocí příkazu „*AT0*“ do datového režimu.

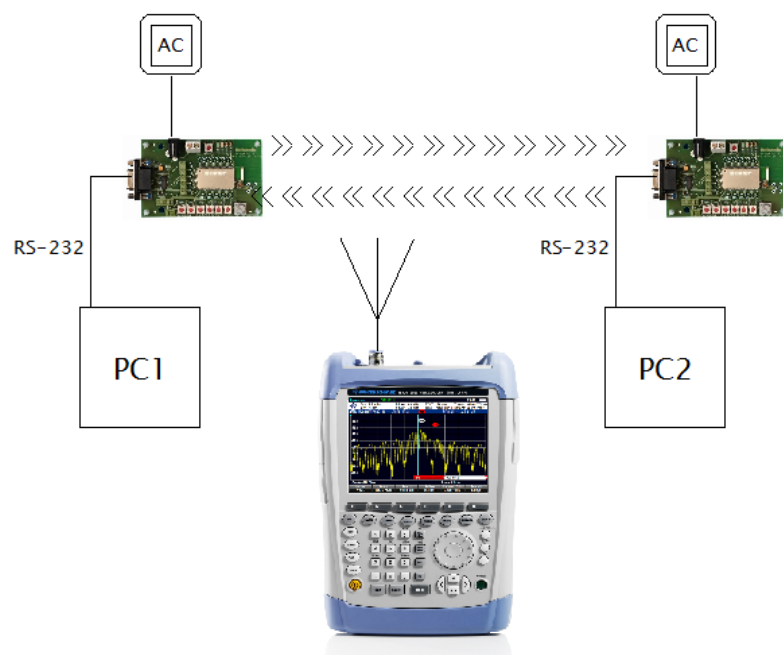
- Na směrovači nastavíme cílovou *MAC* adresu koordinátoru, nastavíme frekvenční kanál a přejdeme do datového režimu.

Spárování obou zařízení:

- V prvním kroku resetujeme koordinátor sítě a následně směrovač.
- Poté se nám v HT u koordinátoru zobrazí „*STATUS07*“, což znamená, že obě zařízení byly spárovány. Dále se zobrazí „*STATUS3*“ a „*STATUS2*“, což znamená, že koordinátor vytvořil síť mezi zařízeními.
- Dále se v HT směrovače zobrazí postupně „*STATUS2*“ a „*STATUS4*“, což znamená, že se směrovač úspěšně připojil do sítě.
- Pokud chceme bez problému posílat textové soubory větší než 64 bytů je nutné ještě nastavit zpoždění znaků na 10 ms, zpoždění řádků 10 ms a zaškrtnout „připojovat kód odřádkování za přicházející řádky“ (Soubor-Vlastnosti-Nastavení-Nastavení ASCII).
- V tento moment psané znaky z jednoho HT se zobrazují v dalším HT a můžeme posílat textové soubory.

3.1.2 Komunikace mezi moduly a měření přijímací úrovně signálu

Po zdárném nastavení i spárování obou zařízení jsem měřil maximální vzdálenost mezi zařízeními při odesílání testovacího souboru s velikostí 70 kB. Schéma měření je na obrázku 3.1. Maximální vzdálenost při komunikaci se velice lišila od toho, co udává výrobce. Při vzdálenosti pouhých 5 m se vyskytovaly chyby a při větší vzdálenosti se komunikace rozpadla. Dále jsem měřil přijímací úroveň signálu při komunikaci pomocí spektrálního analyzátoru *Rohde & Schwarz* FSH8 [13] a všesměrové antény. Přijímací úroveň signálu byla natolik nedostačená, že spektrální analyzátor nebyl schopen zobrazit ani část vysílacího spektra na daném vysílacím kanále. Tyto moduly nebyly použitelné pro praktické měření přímo v dolech, a proto jsem zvolil jako alternativu technologii IEEE 802.11b, která pracuje ve stejném frekvenčním pásmu 2,4 GHz, je výkonově podobná a lehce dostupná. Tato alternativa byla zvolena po konzultaci s vedoucím této práce.



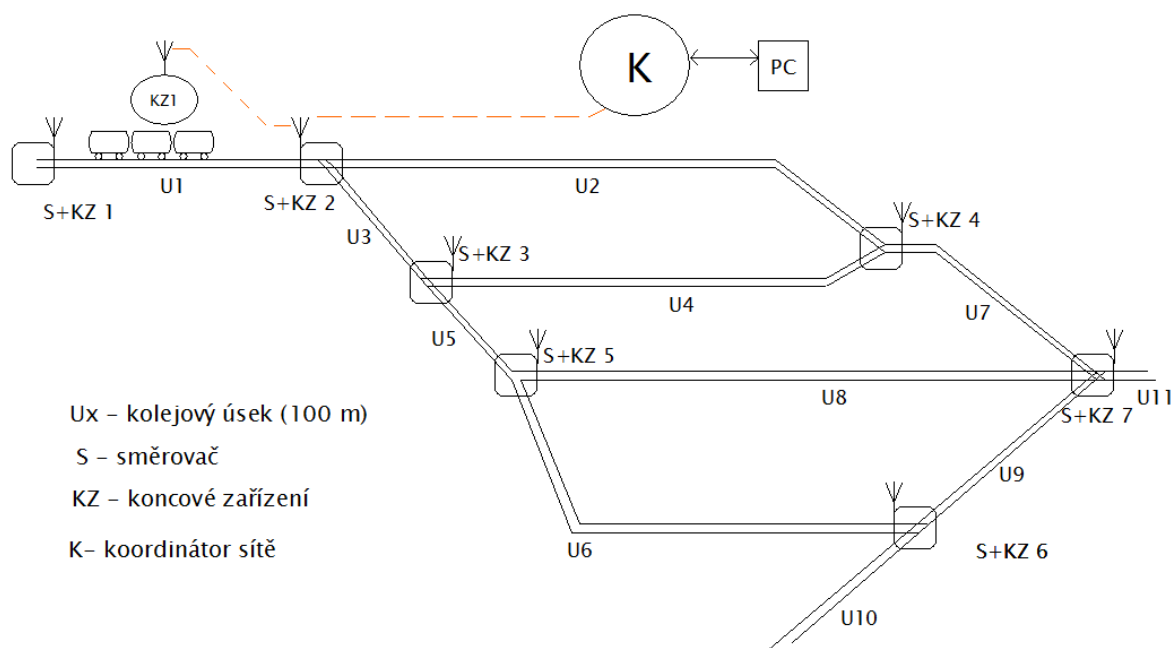
Obrázek 3.1: Schéma měření s moduly RC2200AT

4 Návrh mobilního systému

4.1 Návrh sítě ZigBee

Samotný teoretický návrh sítě ZigBee je uskutečněn pro ovládání kolejové dopravy a to zejména pro ovládání výhybek, ovládání semaforů a ovládání hrázových objektů v prostorách dolů OKD. Pro ovládání bylo zvoleno bezdrátových modulů *ZigBit AMP Module* od firmy Meshnetics (více v kapitole 3.10.3), které se dají nakonfigurovat pomocí AT příkazů (kapitola 3.1.1) nebo pomocí softwarových prostředků *BitCloud*. Výrobce těchto modulů garantuje velký dosah, jak v otevřených, tak v uzavřených prostorech. Kombinují citlivost přijímače až -104 dBm s možným největším vysílacím výkonem až 20 dBm, což přináší těmto modulům největší výhody. Také obsahují množství aplikačních prostředků, což je v mém návrhu kolejové dopravy velice důležité.

Návrh sítě je rozdělen do několika kolejových úseků (obrázek 4.1). Každý úsek je 100 m dlouhý a skládá se ze dvou uzlů. Každý uzel obsahuje jedno koncové zařízení, které komunikuje pomocí binárních portů s pneumatickým klopným obvodem, jenž ovládá výhybky a se stávajícím ovládacím zařízením semaforů. Dále obsahuje jeden směrovač, pomocí kterého jsou přeposílány pakety ke koncovému zařízení, které pošle binární informaci stávajícímu pneumatickému klopnému obvodu a přepne výhybku doprava nebo doleva. V kabině strojvedoucího je umístěno další koncové zařízení, kterým ovládá daný uzel, v kterém se právě nachází. Každé koncové zařízení a každý směrovač mají své unikátní *PAN ID* adresy, pomocí kterých probíhá správné adresování a celá komunikace v síti.



Obrázek 4.1: Návrh ovládání kolejové dopravy

Celá tato síť je řízena jedním páteřním prvkem, který se nazývá koordinátor a určuje, který paket v síti se má přeposlat na danou adresu. Koordinátor sítě je přímo připojen k počítači, kde běží uživatelský program, na kterém je možno celou komunikaci sledovat.

Koordinátor má v sobě uloženo hned několik základních tabulek, dle kterých řídí komunikaci mezi jednotlivými zařízeními. Pokud strojvedoucí chce vjet do nějakého kolejového úseku, koordinátor sítě se podívá do tabulky, kterou má definovanou, zda se už v tomto úseku nějaký vlak nenachází. Pokud zjistí, že tento úsek je volný, zapíše do tabulky (tabulka 4.1) aktuální polohu, kde se momentálně daný vlak nachází. Tato tabulka bude mít tolik řádků, kolik bude dohromady vlaků.

Tabulka 4.1: Informace pro koordinátor, kde se nachází jednotlivé vlaky

Vlak (KZx)	Číslo úseku
KZ1	U1

V tomto případě už koordinátor zjistil, že vlak s označením KZ1 se nachází v úseku číslo 1. Další tabulku má uloženou koordinátor sítě pro orientaci, se kterými zařízeními bude komunikovat. Dle další tabulky (tabulka 4.2) zjistí, s jakým uzlem má strojvedoucí následovně komunikovat a jakou výhybku (koncové zařízení) či hrázový objekt bude obsluhovat z kabiny.

Tabulka 4.2: Tabulka úseků pro orientaci koordinátoru se kterými zařízeními bude komunikovat

Úsek	Směrovač 1	Směrovač 2
1	S1 + KZ1	S2 + KZ2
2	S2 + KZ2	S4 + KZ4

Další tabulka je definována pro každý směrovač a koncové zařízení v jednom uzlu. Ta určuje při pohybu v daném úseku, na jaký úsek může strojvedoucí jet z daného úseku, v kterém se nachází. V kabině má několik tlačítek a to pro ovládání výhybek, ovládání hrázových objektů a zpětný chod pro případ závady. Příklad této tabulky (v tomto případě pro směrovač S2) je uveden v tabulce 4.3.

Tabulka 4.3: Tabulka pro směrovač S2

Úsek	Doleva	Doprava
1	U2	U3
2	U3	U1
3	U1	U2

4.1.1 Příklad komunikace mezi zařízeními

Komunikace zřejmá z obrázku 4.1 probíhá následovně:

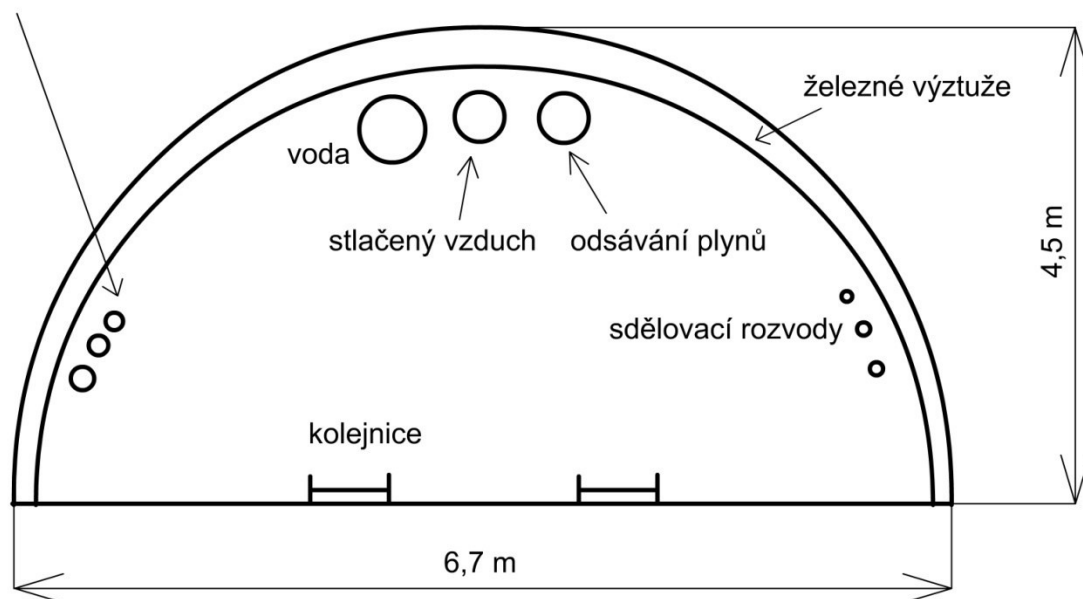
1. Ve vlaku označeném KZ1 chce strojvedoucí z daného úseku vjet do úseku U1
2. Koordinátor se podívá do tabulky úseků a zjistí, s jakým uzlem bude komunikovat
3. Koordinátor sítě zjistí, zda se nenachází v daném úseku žádný jiný vlak
4. Koordinátor umožní vlaku KZ1 vjet do daného úseku U1 a zapíše pozici vlaku do tabulky s informacemi o umístění jednotlivých vlaků
5. Dále koordinátor zjistí, s jakým uzlem bude navazovat spojení následně
6. Při přiblížení vlaku k danému uzlu strojvedoucí dá povel o vjetí do dalšího kolejového úseku a celý proces se zopakuje

4.2 Popis prostředí

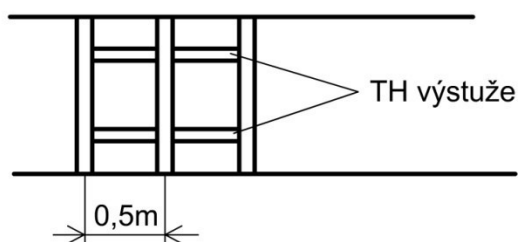
Návrh sítě bude realizován v důlní dopravě v dole Darkov v Karviné. Jedná se v současnosti o jeden z největších hlubinných komplexů v České republice. Tento důl má vlastní úpravnu s kapacitou 800 tun za hodinu. Důl zahrnuje tři samostatné dobývací prostory – Darkov, Karviná a Stonava.

Podmínky na dole jsou velmi specifické také proto, že je výkop umístěný 1000 m pod zemí. Měření bude probíhat při plném provozu, což nám zajistí případné rušení okolními vlivy panujícími na dole. Důlní šachta je 6,7 m široká a 4,5 m vysoká. Po obou stranách jsou umístěny silové rozvody a sdělovací rozvody. Dále jsou zde umístěny vzduchotechnické rozvody se stlačeným vzduchem a vodní potrubí. Po celé šachtě jsou železné konstrukce a železné výztuže. Důlní chodba je konstrukčně podobná jako tunel, proto se zde bude signál šířit specificky (obrázek 4.3). Celé schéma je vidět na obrázku 4.2.

silové rozvody (3x6kV, 3x400V nebo 3x1000V, 220V (pro napájení modulů))



Železná výztuže z bočního úhlu



Obrázek 4.2: Schéma prostředí v důlní chodbě



Obrázek 4.3: Důlní chodba v dole Darkov

4.3 Simulace v simulačním programu I-Prop

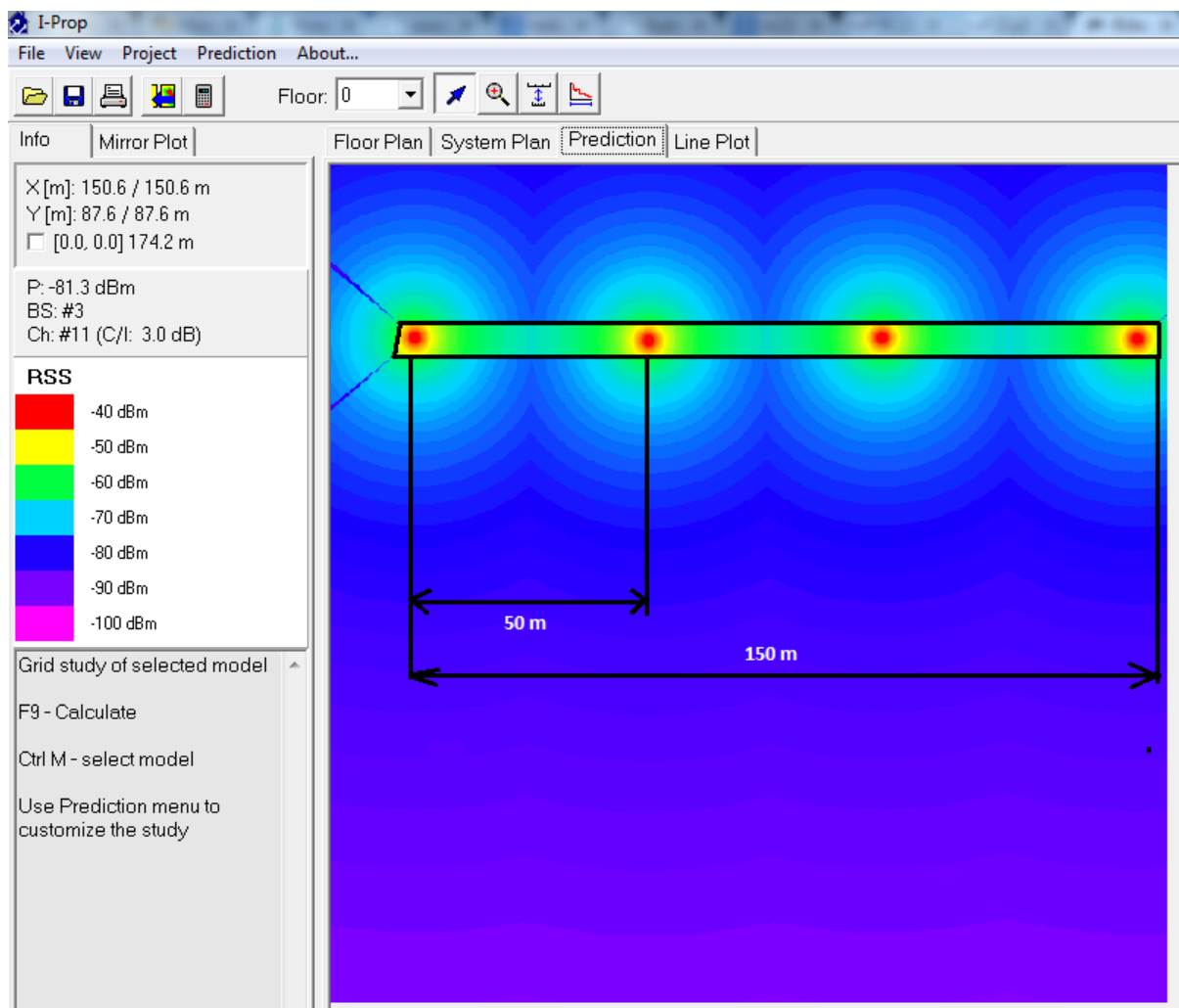
4.3.1 Popis programu

Simulaci jsem prováděl v simulačním programu I-Prop. Tento softwarový nástroj je zaměřený na simulace a interaktivní plánování 3D pikobuňkových bezdrátových systémů uvnitř vícepodlažních a jiných objektů. Jeho součástí jsou modely šíření elektromagnetických vln (signálů) uvnitř budov, které umožňují provádět různé typy analýz pokrytí. Program byl vytvořen pro účely snadného a efektivního základního návrhu pikobuňkového systému, jak pro uživatele znalého problematiky „indoor“ šíření, tak pro uživatele, který se s touto problematikou více neseznámil. Má přehledné výstupy, např. analýza pokrytí, úroveň signálu, nejsilnější stanice a frekvence kanálu [11].

4.3.2 Simulace

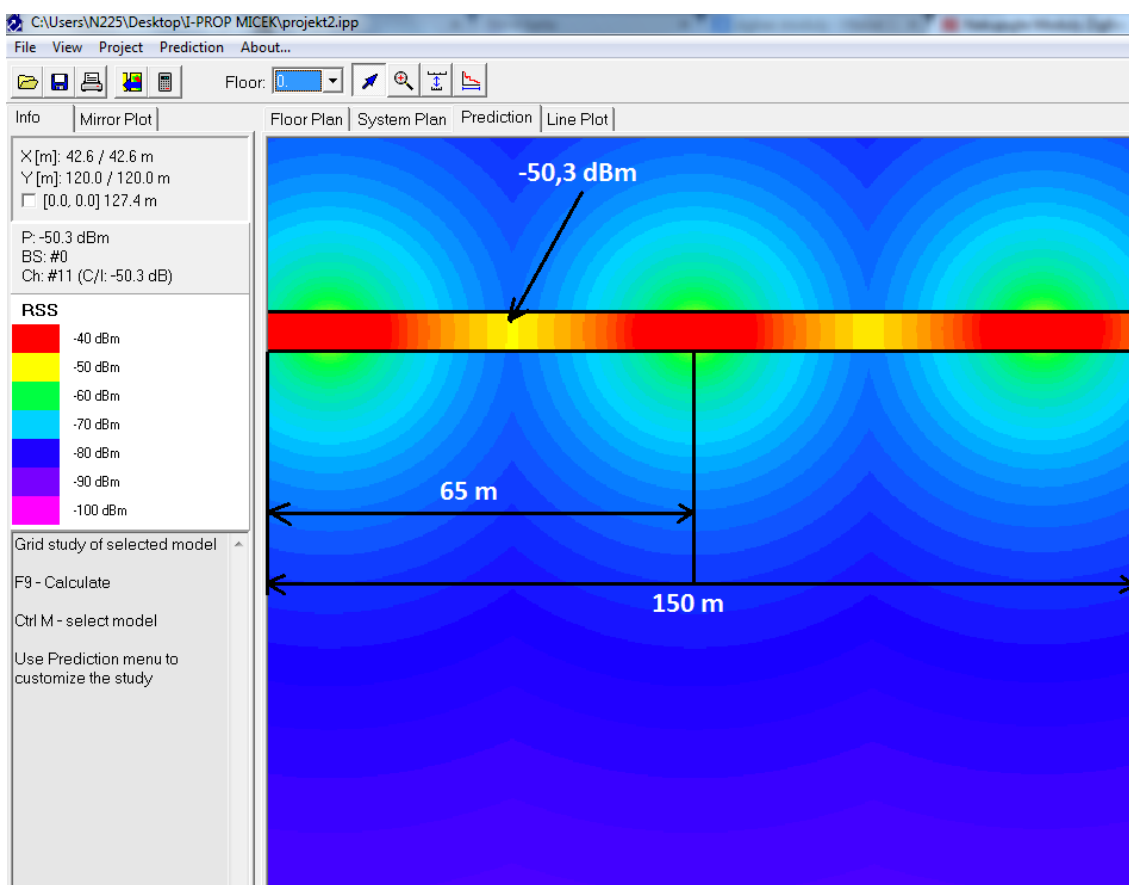
V simulaci jsem použil dané rozměry tunelu přímo v dole Darkov uvedené v kapitole 4.2. Simuloval jsem šíření frekvenčního pásma odpovídající standardu IEEE 802.15.4, což je 2,4 GHz. Simulace je pouze teoretická a může se dost lišit od naměřených hodnot přímo v dole.

Pro první simulaci (obrázek 4.4) jsem umístil čtyři přístupové body s frekvencí 2,450 GHz. U první simulace jsem nastavil výstupní výkon na 0 dBm, což odpovídá výkonu 1 mW. Umístění přístupového bodu bylo 2 m nad zemí. Bylo nasimulováno, že přijímací úroveň signálu nebyla menší než -65 dBm. To znamená, že vzdálenost mezi těmito přístupovými body může být s danými vysílacími parametry použitelná.



Obrázek 4.4: Rozmístění jednotlivých AP 50 m od sebe

V druhé simulaci (obrázek 4.5) jsem zvolil podobnou konfiguraci jako při měření v dole. Vysílací výstupní výkon jsem nastavil na 20 dBm. Celková vzdálenost simulované trasy na obrázku 4.5 je 150 m. Přístupové body jsou od sebe vzdáleny 65 m a jsou umístěny ve výšce 2 m. Maximální úroveň signálu mezi jednotlivými AP je -50 dBm. Tyto hodnoty jsou postačující na rozmístění jednotlivých přístupových bodů ke komunikaci pro použití v kolejové dopravě. Nasimulované hodnoty byly srovnatelné jako při měření přijímací úrovně signálu v důlním prostředí v kapitole 4.4.



Obrázek 4.5: Simulace s výstupním výkonem 20 dBm

4.4 Měření šíření signálu v dolech

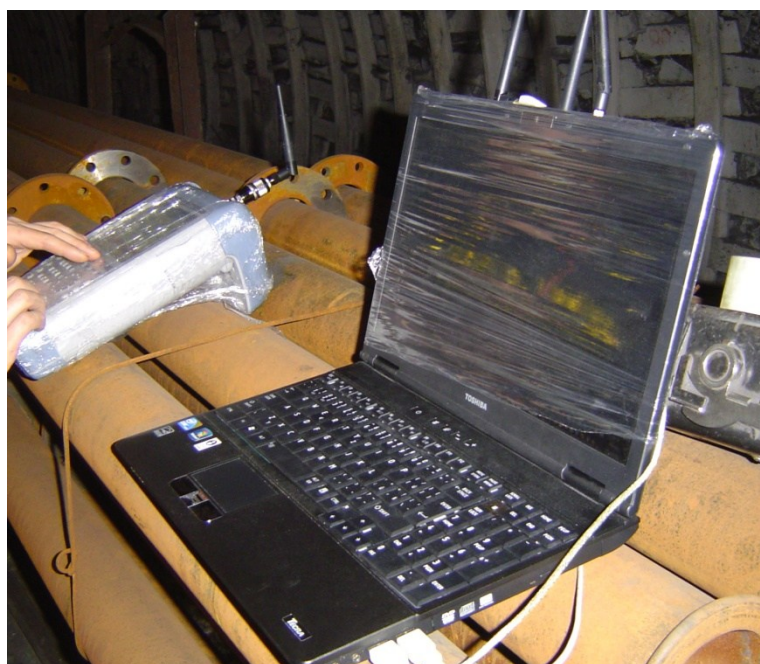
Měření probíhalo na stanovištích v dole Darkov. Měřením jsem ověřoval do jaké vzdálenosti od vysílacího přístupového bodu bude přijímací úroveň signálu dostačující pro bezdrátovou komunikaci pro širokopásmový přenos ve frekvenčním pásmu 2,4 GHz. Jako vysílací stanici jsem zvolil přístupový bod MikroTik [12] s externí anténou D-Link se ziskem 10 dBi (obrázek 4.6). MikroTik vysílá signál v pásmu 2,4 GHz a má vysílací výkon 20 dBm. Přístupový bod jsem napájel pomocí externí 12V baterie. K měření přijímacího signálu v různých vzdálenostech jsem použil spektrální analyzátor Rhode & Schwarz FSH8 (obrázek 4.7) a laptop s programem WifySpy pro analýzu signálu Wi-Fi. Pro analyzátor FSH8 jsem použil všesměrovou anténu se ziskem 10 dBi a u laptopu jsem použil externí všesměrovou anténu se ziskem 4 dBi připojenou přes USB rozhraní (obrázek 4.7).

Vysílací stanice byla umístěna 2 m nad zemí jak je vidět na obrázku 4.6. Dále jsem zvětšoval vzdálenost od přístupového bodu a měřil přijímací úroveň signálu do té doby, než klesla úroveň pod

-85 dBm [4], což je hraniční hodnota signálu potřebná pro bezproblémové navázání komunikace. Měření probíhalo až za zatáčku (obrázek 4.8), kde přijímací úroveň signálu klesala.



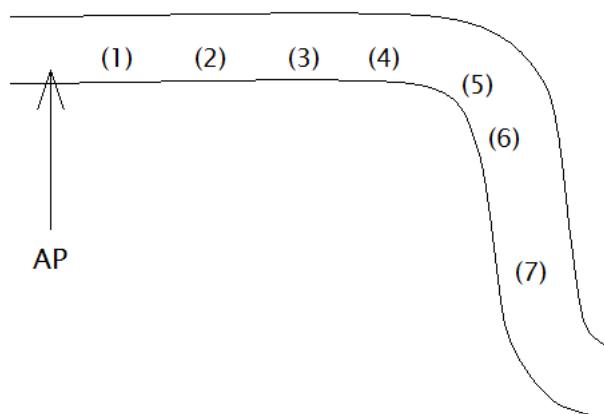
Obrázek 4.46: Všesměrová anténa D-Link a přístupový bod MikroTik



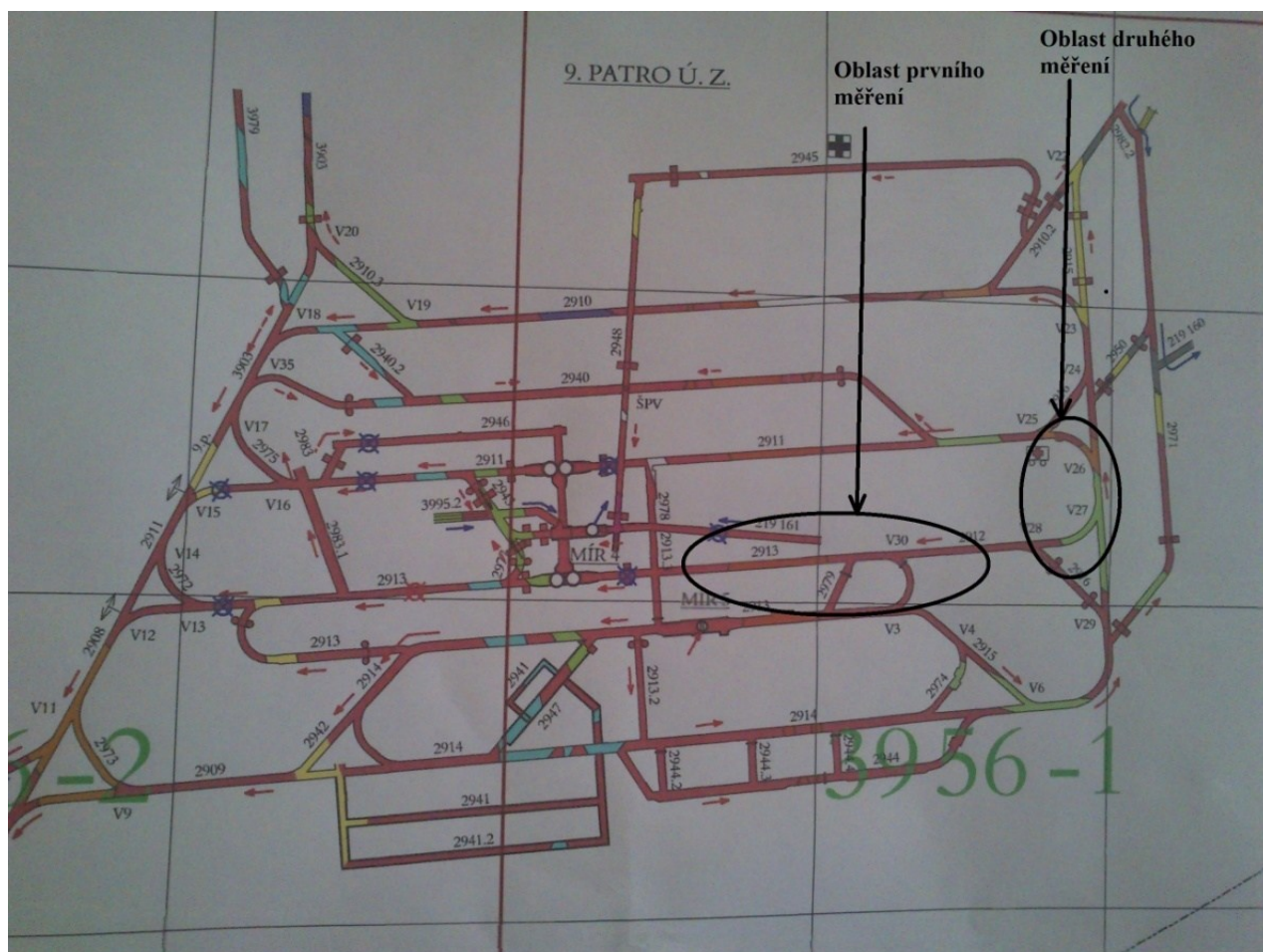
Obrázek 4.47: Měřicí pracoviště s laptopem a spektrálním analyzátozem

4.4.1 Měření přijímací úrovně

První měření probíhalo v tunelu, kde jsem měřil přijímací úroveň signálu na přímou viditelnost a za zatáčku. Na obrázku 4.8 jsou očíslovány pozice, na kterých byla prováděna měření.



Obrázek 4.8: Měření signálu v prvním úseku

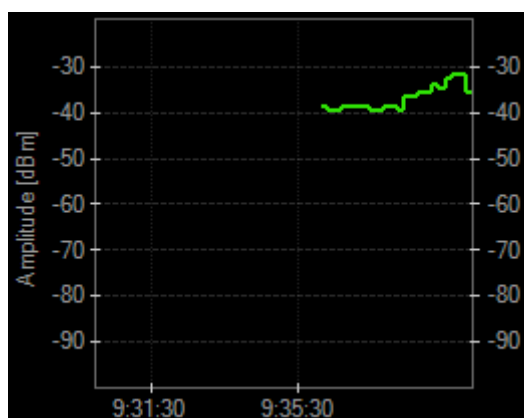


Obrázek 4.9: Schéma dolů a oblasti měření

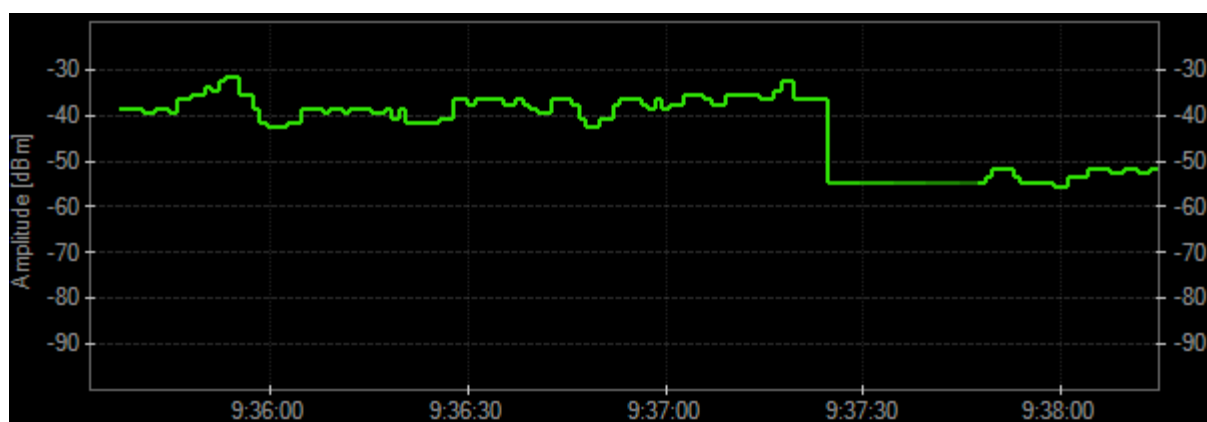
Tabulka 4.1: Naměřené hodnoty s analyzátozem FSH8

Pozice měření	Vzdálenost od AP [m]	Naměřená úroveň signálu [dBm]
1	4	-30
2	30	-47
3	52	-52
4	66	-58
5	67	-57
6	69	-60
7	75	-61
8	135	-80

Na obrázku 4.10 je vidět přijímací úroveň signálu v čase. Na dalších obrázcích vidíme změnu přijímací úrovně v závislosti na vzdálenosti od přístupového bodu. Naměřené hodnoty odpovídají naměřeným hodnotám pomocí analyzátoru R&S FSH8.



Obrázek 4.10: Přijímací úroveň ve vzdálenosti 4 m od AP



Obrázek 4.11: Přijímací úroveň ve vzdálenosti 30 m od AP



Obrázek 4.12: Přijímací úroveň ve vzdálenosti 52 m od AP



Obrázek 4.13: Přijímací úroveň ve vzdálenosti 67 m



Obrázek 4.14: Přijímací úroveň ve vzdálenosti 75 m



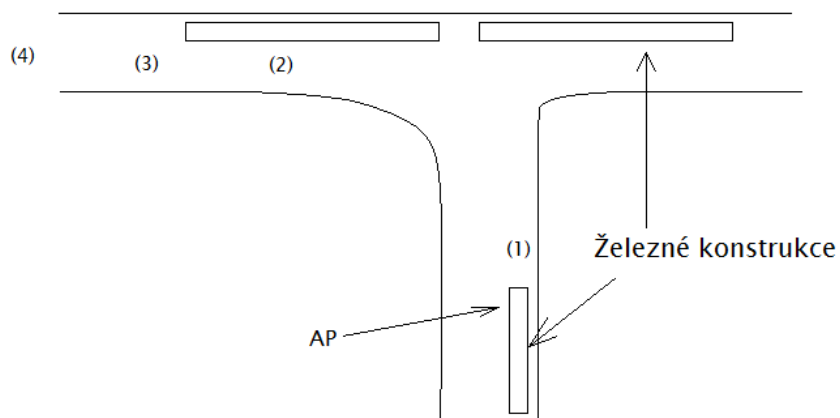
Obrázek 4.15: Přijímací úroveň ve vzdálenosti 135 m od vysílací stanice

Druhé měření probíhalo blízko kovových konstrukcí, které byly uloženy na důlních vagónech (obrázek 4.16). Zjišťoval jsem, zda budou mít vliv na hodnoty přijímací úrovně signálu. V tabulce 4.2 vidíme hodnoty naměřené analyzátozem FSH8 a přiřazené obrázky odpovídající stejným vzdálenostem



Obrázek 4.16: Kovové konstrukce na důlních vagónech

měřeným na laptopu. Na obrázku 4.17 jsou označeny pozice, na kterých jsem prováděl měření. Na obrázku 4.18 vidíme opět podobnou úroveň signálu naměřenou pomocí analyzátozu na laptopu jako na analyzátozu FSH8, na kterém jsem naměřil úroveň přijímaného signálu -27 dBm (tabulka 4.2).



Obrázek 4.17: Měření signálu u železných konstrukcí

Tabulka 4.2: Naměřené hodnoty pomocí analyzátoru FSH8 a čísla obrázků měřených pomocí laptopu

Obrázek [číslo]	Pozice měření	Vzdálenost od AP [m]	Naměřená úroveň signálu [dBm]
4.18	1	3	-27
4.19	2	33	-56
4.20	3	55	-60
4.21	4	63	-70



Obrázek 4.18: Přijímací úroveň ve vzdálenosti 3 m od AP

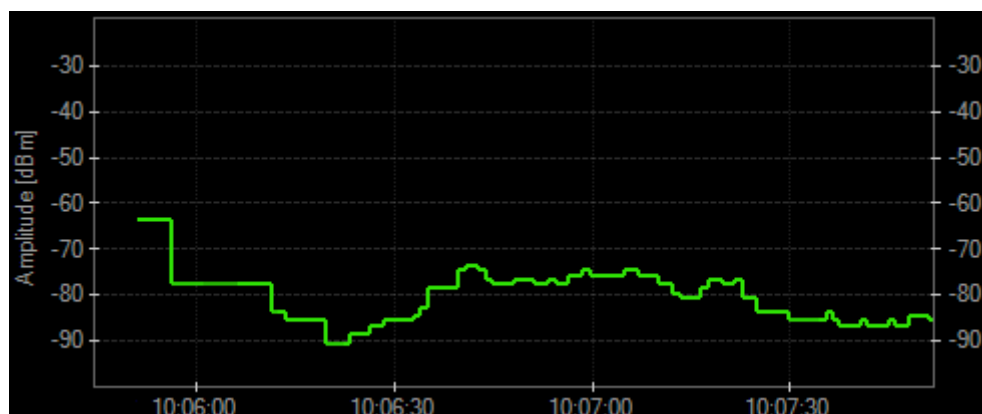
Při zvětšení vzdálenosti na 33 m (obrázek 4.19) klesne úroveň signálu na -62 dBm, což je zřejmě způsobeno rušením kovovými konstrukcemi v trase měření.



Obrázek 4.19: Přijímací úroveň ve vzdálenosti 33 m od AP



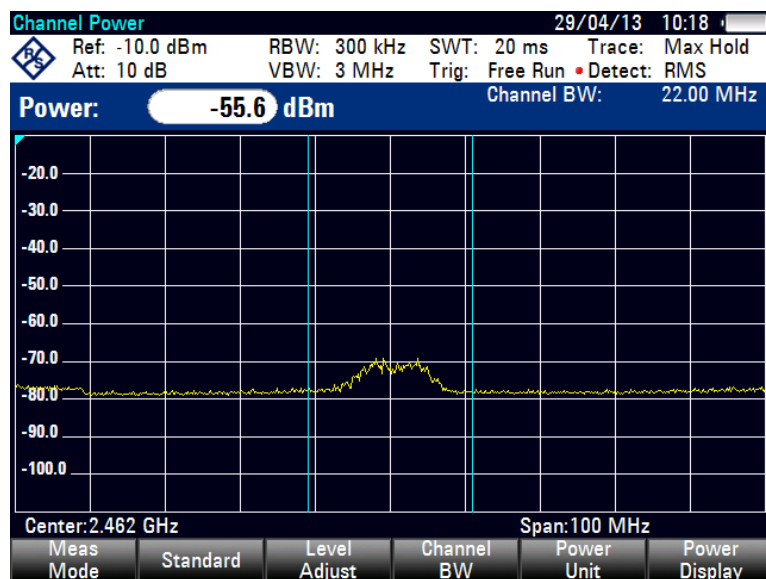
Obrázek 4.20: Ve vzdálenosti 55 m od AP klesla úroveň na -76 dBm



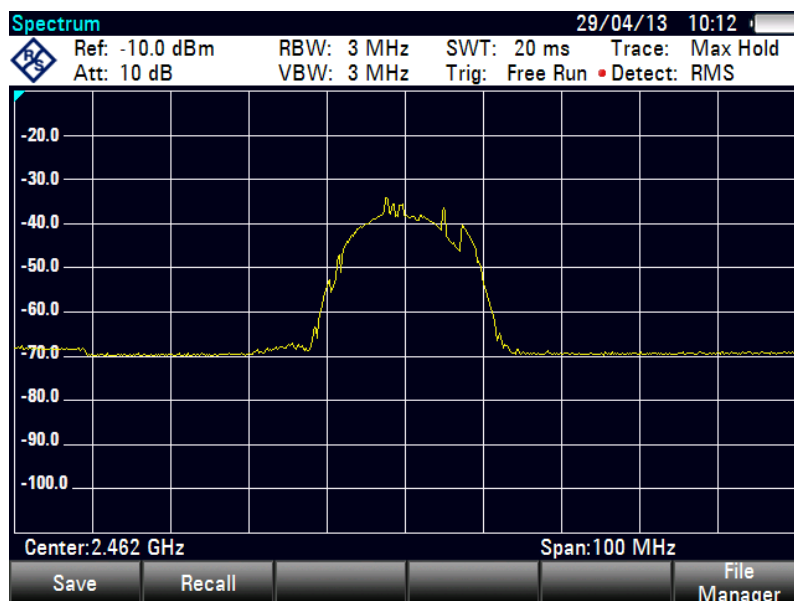
Obrázek 4.21: Při vzdálenosti přes 70 m klesla úroveň přes -80 dBm



Obrázek 4.22: Přijímaná úroveň signálu ve vzdálenosti 3 m naměřená analyzátozem R&S FSH8



Obrázek 4.23: Přijímaná úroveň ve vzdálenosti 33 m



Obrázek 4.24: Spektrum měřeného pásma

4.4.2 Zhodnocení měření

Při prvním měření jsem zjistil, že signál se v těchto podmínkách dobře šíří na přímou viditelnost a do určité vzdálenosti i za zatáčku. Se zvětšující se vzdáleností za zatáčkou úroveň signálu velmi klesá.

Při druhém měření, kde jsem zjišťoval ovlivnění šíření kovovými konstrukcemi a šíření za zatáčkou, jsem dospěl k závěru, že by mohly tyto konstrukce mírně ovlivnit šíření signálu, čemuž se dá předejít, pokud bych umístil vždy do zatáčky jeden vysílací bod navíc na přímou viditelnost k přístupovému bodu.

5 Závěr

V této bakalářské práci jsem zpracoval popis a aplikační možnosti ZigBee technologie (kapitola 2.2). V další kapitole (kapitola 2.3) se zaměřuji na srovnání s jinými bezdrátovými technologiemi. Seznamuji čtenáře se základními zařízeními v senzorových sítích ZigBee (kapitola 2.5). V další části popisuji základní strukturu komunikačního kanálu ZigBee (kapitola 2.8), jednotlivé vrstvy ZigBee modelu a strukturu datového rámce (kapitola 0). Dále jsem popsal ZigBee moduly (kapitola 2.10), které jsou v této době dostupné na trhu a vybral jsem modul ZigBit AMP Module od firmy Meshnetis, který jsem zvolil pro svůj návrh. V další kapitole jsem provedl komunikaci s vývojovým kitem firmy Radiocrafts RC2200AT-SPPIO, popsal jeho konfiguraci a snažil se změřit výstupní vysílací výkon těchto modulů.

V další části práce jsem teoreticky navrhnul mobilní systém s komponenty ZigBee pro praktické ověření této technologie v těžkých průmyslových provozech dolů a hutí (kapitola 4). Návrh je realizován pro kolejovou dopravu pro ovládání výhybek, semaforů a hrázových objektů. Popsal jsem konkrétní návrh pro několik kolejových úseků a vyřešil komunikaci mezi jednotlivými zařízeními v této senzorové síti.

V první fázi jsem ověřil návrh pomocí simulace. Provedl jsem simulaci šíření signálu v těžkých provozech dolů pomocí simulačního programu I-Prop. Rozmístil jsem jednotlivé přístupové body do určitých vzdáleností a zjišťoval maximální vzdálenost mezi nimi pro bezproblémovou komunikaci. Z výsledků simulace plyne, že maximální vzdálenost mezi jednotlivými zařízeními v síti při maximálním výstupním výkonu 0 dBm je 50 m. Při výstupním výkonu 20 dBm, což byl maximální výkon zařízení použitého pro měření v dolech (kapitola 4.4), byla vzdálenost mezi těmito zařízeními 65 m. Výsledky simulace odpovídají praktickému měření v dolech (kapitola 4.4).

Při praktickém návrhu a ověření funkčnosti Zigbee modulů se vyskytovaly problémy, které jsou popsány v kapitole 3.1.2. Proto byl zvolen standard IEEE 802.11.b. Tato alternativa byla zkontrolována s vedoucím práce.

Největší přínos této práce je praktické měření v dole Darkov (kapitola 4.4). Zde jsem měřil přijímací úroveň signálu v určitých vzdálenostech od vysílacího bodu v pásmu 2,4 GHz. Vysílací zařízení bylo nakonfigurováno na výstupní výkon 20 dBm. Z výsledků měření, uvedených v kapitole 4.4.1, vyplývá, že přijímací úroveň v těchto podmínkách je dostatečná pro komunikaci na přímou viditelnost, avšak při měření za zatáčkou úroveň signálu rapidně klesá. Toto je způsobeno ocelovými konstrukcemi poblíž měření, které signál ruší a horším šířením signálu za překážkou.

Použitá literatura

- [1] ŽALUD, Václav. *Moderní radioelektronika*. 1. vyd. Praha: BEN, 2000, 656 s. ISBN 80-86056-47-3.
- [2] FARAHANI, Shahin. *ZigBee wireless networks and transcievers*. Amsterdam: Elsevier ; Newnes, 2008. xxiv, 339 s. ISBN 978-0-7506-8393-7. EADY, Fred. *Hands-on ZigBee: implementing 802.15.4 with microcontrollers*. Amsterdam: Elsevier/Newnes, c2007. xiii, 336 s. ISBN 978-0-12-370887-8.
- [3] GISLASON, Drew. *Zigbee wireless networking*. Amsterdam: Elsevier / Newnes, c2008. xvi, 425 s. ISBN 978-0-7506-8597-9.
- [4] PECHAČ, Pavel a Stanislav ZVÁNOVEC. *Základy šíření vln pro plánování pozemních rádiových spojů*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2007. 199 s. ISBN 978-80-7300-223-7.
- [5] Hw.cz server. *ZigBee - novinka na poli bezdrátové komunikace* [online]. [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/navrh-obvodu/rozhrani/zigbee-novinka-na-poli-bezdratove-komunikace.html>
- [6] Automatizace.hw.cz server. *ZigBee PRO - nová vylepšená verze bezdrátové komunikace ZigBee* [online]. [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/zigbee-pro-nova-vylepsena-verze-bezdratove-komunikace-zigbee>
- [7] ČEPL, Josef. *Měření vzdálenosti pomocí technologie ZigBee: Distance measurement by ZigBee technology*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 1 elektronický optický disk [CD-ROM / DVD]. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/5534/Diplomova_prace_final.pdf?sequence=1
- [8] BRADÁČ, PH.D., Ing. Zdeněk, Ing. Petr FIEDLER, Ing. Ondřej HYNČICA, Ing. František BRADÁČ, PH.D. Automatizace. *Bezdrátový komunikační standard ZigBee*. 2005, roč. 48, č. 4.
- [9] BROŽ, Bc. Kamil. *Uživatelská aplikace pro konfiguraci bezdrátového modulu ZigBee*. Brno, 2012. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/9043/DP%20-%20Kamil%20Bro%C5%BE.pdf?sequence=2>
- [10] ATMEL. *ZigBit 2.4GHz Amp Module with U.FL Connector: Datasheet* [online]. [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: <http://www.atmel.com/Images/doc8228.pdf>

-
- [11] ZDRÁHAL, Bc. František. Využití bezdrátové technologie WIFI v průmyslových provozech. Ostrava, 2010. Dostupné z:
https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/78648/ZDR032_FEI_N2647_2601T013_2010.pdf?sequence=1
- [12] ROUTERBOARD. *Routerboard.com: RB751G-2HnD* [online]. [cit. 2013-05-06]. Dostupné z:
<http://routerboard.com/RB751G-2HnD>
- [13] RHODE & SCHWARZ. *Rohde-schwarz.com: FSH8 Spectrum Analyzer* [online]. [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: http://www.rohde-schwarz.com/en/product/fsh4-8-productstartpage_63493-8180.html
- [14] RADIOCRAFTS. *Radiocrafts.com: Datasheet RC2200AT-SPPIO* [online]. [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: http://www.radiocrafts.com/uploads/rc2200at-sppio_data_sheet_0_71.pdf
- [15] RADIOCRAFTS. *Radiocrafts.com: RC2200DK-SPPIO ZigBee™-ready Demonstration Kit Quick Start* [online]. [cit. 2013-05-06]. Dostupné z: http://www.hw.cz/pdf/RC2200DK-SPPIO_Quick_Start_1_0.pdf
- [16] ŠTEFANY, Bc. Martin. *ZigBee zařízení pro monitorování spotřeby elektrické energie*. Brno, 2012.
- [17] FREESCALE SEMICONDUCTOR. *Freescale.com: Transceivers and Wireless MCUs* [online]. [cit. 2013-05-06]. Dostupné z:
http://www.freescale.com/webapp/sps/site/taxonomy.jsp?code=RF_TRANSCEIVERS
- [18] MICROCHIP TECHNOLOGY INC. *Microchip.com: Datasheet MRF24J40MA* [online]. [cit. 2013-05-07]. Dostupné z:
<http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en535967>
- [19] MICROCHIP TECHNOLOGY INC. *Microchip.com: PIC® Microcontrollers* [online]. [cit. 2013-05-07]. Dostupné z: <http://www.microchip.com/pagehandler/en-us/products/picmicrocontrollers>